变阻流区厚度的 T 型模具流道设计方法

麻向军

（华南理工大学聚合物成型加工工程教育部重点实验室，聚合物新型成型装备国家工程研究中心，510640 广州）

摘　要：热塑性塑料片材或流涎膜常用 T 型模具挤出成型，采用等歧管半径和等阻流区厚度的流道结构时，通常采用增加歧管半径或减小阻流区厚度的方法提高熔体出口流率沿流道宽度方向的均匀性，前者有利于降低挤出压力，但熔体停留时间显著增加，而后者有利于降低熔体停留时间，但挤出压力急剧增大。基于对流道中熔体流动的分析，采用沿流道宽度方向减小歧管半径的结构减小熔体停留时间，沿流道宽度方向增加阻流区厚度的结构降低挤出压力，在满足沿流道宽度方向熔体出口流率均匀的条件下，利用流变学理论推导了阻流区厚度沿流道宽度方向变化的微分方程，对该方程进行数值求解并拟合可得到阻流区厚度。与等歧管半径和等阻流区厚度的流道相比，变歧管半径和变阻流区厚度的流道可以显著降低挤出压力和熔体停留时间。同时，通过对歧管尺寸和形状的设计，在不显著增加挤出压力的情况下能够显著降低熔体停留时间，而通过阻流区长度和厚度的设计，在不增加熔体停留时间的情况下调整挤出压力以适应不同的成型要求。

关键词：变阻流区厚度；变歧管半径；熔体出口流率；挤出压力；熔体停留时间；流变学

中图分类号：TG76　　**文献标志码：**A

Design method for flow channel in T die with variant thickness of chock zone

MA Xiangjun

（The Key Laboratory of Polymer Processing Engineering of the Ministry of Education，National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing，South China University of Technology，510640 Guangzhou，China）

Abstract：T die is usually used to manufacture the sheet or casting film of thermoplastics. In order to improve the thickness uniformity of product manufactured using T die with constant radius manifold and constant thickness choke zone，increasing the radius of the manifold or decreasing the thickness of the choke zone was usually adopted to improve melt exit flow rate. However，a larger manifold diameter would prolong the melt residence time although it is beneficial to decreasing extrusion pressure，while a thinner chock zone would increase the extrusion pressure although it is beneficial to shortening the melt residence time. A new structure of flow channel with decreasing radius of manifold and increasing thickness of choke zone along the width of flow channel is proposed in this paper to shorten the melt residence time and reduce the extrusion pressure based on the analysis of melt flow characteristics in flow channel. Under the condition of

收稿日期：2021-07-15　　**修回日期：**2022-03-20

基金项目：国家重点研发计划项目（No. 2019YFB1704900）

通信作者：麻向军，副教授。E-mail：xjma@ scut. edu. cn

引用格式：麻向军. 变阻流区厚度的 T 型模具流道设计方法［J］. 应用力学学报，2022，39（4）：791-796.

MA Xiangjun. Design method for flow channel in T die with variant thickness of chock zone［J］. Chinese journal of applied mechanics，2022，39（4）：791-796.

uniform melt exit flow rate along the width of the flow channel, the differential equation of thickness of chock zone is deduced based on rheology, which can be solved by numerical method and fitted in design. Compared with flow channel with constant radius manifold and constant thickness choke zone, the proposed flow channel with thickness-varying chock zone and radius-varying manifold is beneficial to decrease the extrusion pressure and shorten the melt residence time significantly. Using the proposed flow channel in T die design, the melt residence time can be shortened further without increasing extrusion pressure significantly by the dimension and shape design of manifold, while the extrusion pressure can be adjusted to meet extrusion requirement without increasing melt residence time by the length and thickness design of choke zone.

Key words: variant thickness of chock zone; variant radius of manifold; melt exit flow rate; extrusion pressure; melt residence time; rheology

T 型模具常用于热塑性塑料片材和流涎膜的挤出成型，其流道设计要求沿流道宽度方向的熔体出口流率均匀一致[1]。T 型模具的流道中，熔体沿歧管向流道两侧流动时压力非线性下降，流道宽度较大时，歧管中熔体的压力下降较大，采用等阻流区厚度的流道时，沿流道宽度方向的熔体出口流率相差大[2]。受模具长度的限制，通常采用增加歧管半径以减小熔体在歧管中的压力降和减小阻流区厚度以提高熔体在阻流区中的压力降来提高熔体出口流率均匀性。增加歧管半径会显著增加熔体停留时间，而减小阻流区厚度会显著增加挤出压力[3]。

从流道几何形状和模具结构方面提高熔体出口流率均匀性的措施有变阻流区长度、变阻流区厚度和加装阻流棒。变阻流区长度是保持阻流区厚度不变，沿流道两侧减小阻流区长度，但该结构难以应用于实际生产；变阻流区厚度是保持阻流区长度不变，沿流道两侧增加阻流区厚度[4]；加装阻流棒的结构在成型时通过调节阻流棒进而改变阻流区的局部间隙来提高熔体出口流率均匀性，但使模具结构变得复杂，制造难度增加。流道设计不良时，即使调节阻流棒也难以达到熔体出口流率均匀的要求[5-8]。近年来亦采用将阻流区设计为厚度不同的两个区域以提高熔体出口流率均匀性，但由于缺乏设计理论的指导，通常仍需要加装阻流棒并通过修模来改善熔体出口流率均匀性[9]。对于变阻流区厚度的流道结构，已有采用等歧管半径的设计公式[1,4]，但是，熔体在歧管中的流率沿流道宽度方向减小，造成熔体在歧管中的停留时间迅速增加，不利于易降解材料的挤出成型。为此，本研究通过对 T 型模具流道中熔体的流动进行分析，采用半径沿流道两侧逐渐减小的歧管和厚度沿流道两侧逐渐增加的阻流区，基于沿流道宽度方向熔体出口流率均匀的条件，对流道结构和尺寸进行流变学设计，以期降低 T 型模具的挤出压力和熔体停留时间。

1　流道几何形状的流变学设计

1.1　阻流区厚度的理论推导

变歧管半径和变阻流区厚度的流道结构如图 1 所示，由入口区、歧管、阻流区、松弛区和成型区组成。熔体由流道入口进入歧管后，沿歧管向流道两侧流动的同时，一部分熔体进入阻流区并沿挤出方向流动，因此，歧管中熔体的压力和体积流率沿流道两侧逐渐减小。为此，本研究采用沿流道两侧歧管半径逐渐减小的结构以提高熔体在歧管中的流速，从而达到降低熔体停留时间的目的，采用沿流道两侧增加阻流区厚度的结构以减小在流道宽度方向上熔体沿挤出方向的流动阻力，从而达到降低挤出压力的目的。

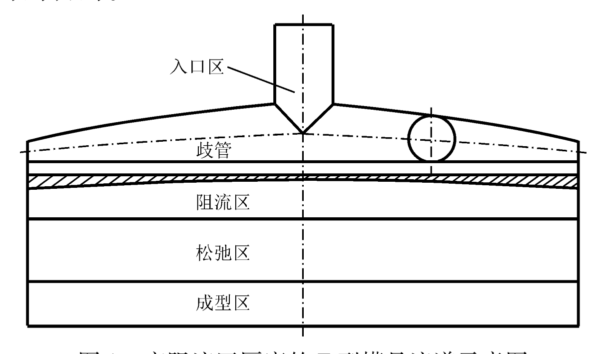


图 1　变阻流区厚度的 T 型模具流道示意图

Fig. 1　Diagram of flow channel in T die with variant thickness of choke zone

T 型模具的流道在宽度方向具有对称性，因此取流道宽度方向的 1/2 模型进行分析，并建立如图 2

所示的坐标系。歧管截面选取圆形，其他形状可通过形状因子进行换算。

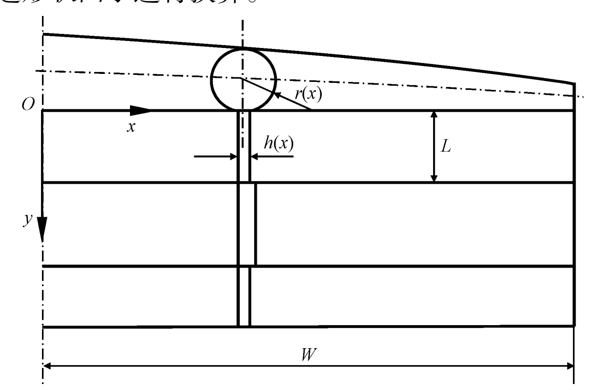


图 2　变阻流区厚度的 T 型模具流道设计模型

Fig. 2　Design model of flow channel in T die with variant thickness of chock zone

分析熔体在流道中的流动时，可做如下假设[1,4]。

1）挤出成型中，熔体可视为不可压缩流体。

2）熔体在流道中的流动为充分发展的稳态层流流动，由于熔体的黏度大，忽略惯性力和体积力。

3）忽略入口区的影响，歧管中的熔体沿歧管方向流动，阻流区、松弛区和成型区中的熔体沿挤出方向流动，熔体在歧管中的流动和在阻流区中的流动互不干涉。

4）歧管半径沿流道宽度方向的变化很小，忽略因歧管半径变化引起的拉伸对熔体流动的影响。

5）流道宽度远大于阻流区、松弛区和成型区的厚度，忽略流道宽度方向两侧壁对熔体流动的影响。

6）由于剪切热小，熔体流动可视为等温流动，采用幂律模型描述熔体的流变性能，即

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \qquad (1)$$

其中：η 为熔体黏度；K 为稠度；$\dot{\gamma}$ 为剪切速率；n 为熔体的非牛顿指数。

根据以上假设，流道宽度方向任一位置 x 处，歧管中熔体沿流动方向的压力梯度为[10]

$$\frac{\mathrm{d}p(x)}{\mathrm{d}x} = -2K\left(\frac{3n+1}{\pi n}\right)^n \frac{Q^n(x)}{r^{3n+1}(x)} \qquad (2)$$

其中：$p(x)$ 为歧管中熔体的压力；$Q(x)$ 为歧管中熔体的体积流率；$r(x)$ 为歧管半径。

假定熔体在流道入口处的体积流率为 $2Q_0$，熔体出口流率沿流道宽度方向均匀时，有

$$Q(x) = Q_0\left(1 - \frac{x}{W}\right) \qquad (3)$$

其中 W 为流道宽度的一半。

式(3)代入式(2)，有

$$\frac{\mathrm{d}p(x)}{\mathrm{d}x} = -2K\left(\frac{3n+1}{\pi n}\right)^n \frac{Q_0^{\ n}}{r^{3n+1}(x)}\left(1 - \frac{x}{W}\right)^n \qquad (4)$$

另一方面，沿流道宽度方向单位宽度的熔体出口流率均匀时，流道宽度方向任一位置 x 处，熔体在阻流区中沿挤出方向的压力降为

$$\Delta p_{\mathrm{D}}(x) = 2K\left(\frac{4n+2}{n}\right)^n \left(\frac{Q_0}{W}\right)^n \frac{L}{h^{2n+1}(x)} \qquad (5)$$

其中：$\Delta p_{\mathrm{D}}(x)$ 为熔体在阻流区中的压力降；$h(x)$ 为阻流区厚度；L 为阻流区的长度。

松弛区和成型区的长度和厚度沿流道宽度方向不变，因此，阻流区出口处的熔体流率和压力均沿流道宽度方向不变时，熔体出口流率沿流道宽度方向均匀。根据假设 3），流道宽度方向任一位置 x 处，阻流区入口处的压力与歧管中熔体的压力相等，因此，歧管中熔体沿流动方向的压力梯度与阻流区中熔体的压力降沿流道宽度方向的梯度相等，有

$$\frac{\mathrm{d}p(x)}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}\Delta p_{\mathrm{D}}(x)}{\mathrm{d}x} \qquad (6)$$

由式(4)～(6)可得

$$\frac{\mathrm{d}h(x)}{\mathrm{d}x} = \frac{1}{2n+1}\left[\frac{3n+1}{2\pi(2n+1)}\right]^n \frac{h^{2n+2}(x)W^n}{r^{3n+1}(x)L}\left(1 - \frac{x}{W}\right)^n \qquad (7)$$

式(7)即为阻流区厚度沿流道宽度方向变化的微分方程。其边界条件为

$$x = W, h(x) = h_{\mathrm{E}} \qquad (8)$$

其中 h_{E} 为阻流区在流道末端的厚度。

1.2　讨　论

由式(7)可以看出，影响阻流区厚度的因素包括歧管半径沿流道宽度方向的变化、阻流区长度、流道宽度及熔体的非牛顿指数。流道宽度由产品规格决定，熔体的非牛顿指数是熔体的材料参数。流道设计时，确定阻流区长度和歧管半径及其变化规律后，可根据式(7)求解阻流区厚度。

由式(7)可以看出，$h(x)$ 是 x 的单调增函数，即阻流区厚度沿流道宽度方向增加。流道设计中，歧管末端直径通常大于阻流区厚度，即歧管末端半径不为 0，当歧管半径沿流道宽度方向减小时，需要对式(7)进行数值求解并拟合得到阻流区沿流道宽度方向的厚度。

熔体由歧管入口沿任一路径流经歧管和阻流区的压力降相等，求出阻流区厚度后，可用流道对称面处熔体在阻流区的压力降计算，即

$$\Delta p_D|_{x=0}=2K\left(\frac{4n+2}{n}\right)^n\left(\frac{Q_0}{W}\right)^n Lh_C^{-(2n+1)} \quad (9)$$

其中 h_C 为阻流区在流道对称面处的厚度。

熔体在歧管中由入口流动到任一位置 x 处的停留时间 $t(x)$ 为

$$\frac{dt(x)}{dx}=\frac{\pi r^2(x)W}{Q_0(1-x/W)} \quad (10)$$

由于歧管半径沿流道宽度方向减小且在流道末端的半径不为0,式(10)亦需要采用数值方法求解,其边界条件为

$$x=0, t(x)=0 \quad (11)$$

1.3 阻流区理论厚度的验证

以一种片材挤出成型的T型模具流道设计为例,采用文中推导的变歧管半径条件下阻流区厚度微分方程设计阻流区。对所设计的流道进行三维建模,采用数值模拟软件对流道中熔体的流动进行数值模拟。定义熔体出口无量纲流率为沿流道宽度方向某一位置单位宽度的体积流率与平均单位宽度的体积流率的比值,通过计算熔体出口无量纲流率沿流道宽度方向的变化反映熔体出口流率均匀性。

片材材料为ABS,加工温度为220 ℃,流变模型的参数为:$K=7\,496.8$ Pa · $s^{0.486}$, $n=0.486$[11]。片材宽度取2 500 mm,松弛区和成型区的长度分别为40 mm和20 mm,厚度分别为4 mm和1.5 mm。阻流区长度取50 mm,在流道末端的厚度取2 mm,歧管半径在流道对称面和末端处分别取20 mm和8 mm,沿流道宽度方向按指数减小,即

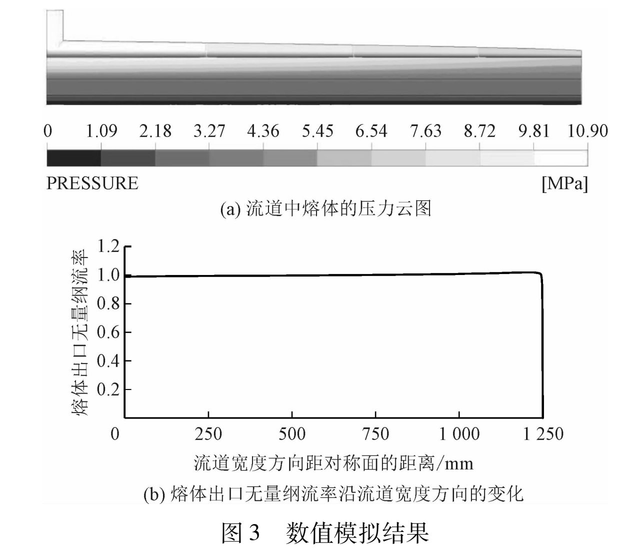
$$r(x)=R_E+(R_C-R_E)(1-x/W)^m \quad (12)$$

其中:R_C 和 R_E 分别为流道对称面和末端处的歧管半径;m 为指数。

取式(12)中的 $m=0.7$,根据上述流道结构参数,采用四阶显式Runge-Kutta法[12]求解阻流区厚度的微分方程(7),采用样条曲线拟合阻流区沿流道宽度方向的厚度,利用三维设计软件进行流道建模。由于流道在宽度方向具有对称性,取其1/2模型进行计算。为提高计算精度,采用六面体单元对流道划分网格,且在速度梯度变化较大的区域采用较小的网格尺寸。此外,流场求解中速度场采用二次插值,压力场采用线性插值以进一步提高计算精度。

图3是数值模拟得到的挤出速度为30 mm/s时的熔体压力云图和熔体出口无量纲流率沿流道宽度的变化。由图3(a)可以看出,在阻流区和松弛区交界处,熔体的压力沿流道宽度方向不变。模拟计算得到的歧管中的熔体压力降与采用四阶显式Runge-Kutta法求解歧管中熔体压力梯度微分方程(4)得到的压力降一致,流道末端处阻流区中的熔体压力降与采用式(5)计算的压力降一致。

由图3(b)可以看出,沿流道宽度方向,熔体出口无量纲流率由流道对称面处的0.989逐渐增加至1.018,在流道末端约10 mm的范围内,熔体出口无量纲流率快速下降到0。在理论推导中,假定熔体在阻流区中仅沿挤出方向流动,且阻流区出口处熔体压力沿流道宽度方向不变,但在阻流区入口处,沿流道宽度方向的熔体压力梯度不为零,造成熔体出口流率沿流道宽度方向增加。但是,阻流区中的熔体沿流道宽度方向的压力梯度远小于沿挤出方向的压力梯度,因此,熔体出口无量纲流率沿流道宽度的变化很小。造成流道末端熔体出口无量纲流率快速下降的原因是,理论推导中忽略了流道宽度方向侧壁对熔体流动的影响,而在模拟计算时,熔体与流道侧壁之间为无滑移边界,存在流动边界层,边界层中熔体出口无量纲流率小于1。尽管熔体出口流率沿流道宽度方向存在一定的差异,但其差异很小,说明本研究的假设和理论推导是合理的,采用本研究的设计方法能够满足工程要求。



(a) 流道中熔体的压力云图

(b) 熔体出口无量纲流率沿流道宽度方向的变化

图3 数值模拟结果

Fig. 3 Numerically simulated results of pressure contour and non-dimensional melt exit flow rate

2 流道结构参数的影响

T型模具的流道设计不仅要求熔体出口流率沿

流道宽度方向要均匀一致,而且要求熔体流经整个流道的压力降要适中,熔体在流道中的停留时间要尽可能短[1]。熔体由歧管入口沿任一路径流经歧管和阻流区的压力降对T型模具流道设计具有重要影响,该压力降由歧管尺寸及其沿流道宽度方向的变化规律和阻流区长度及其在流道末端的厚度共同决定。当歧管尺寸及其变化规律和阻流区长度及其在流道末端的厚度确定后,采用数值方法求解式(7)可得到阻流区沿流道宽度方向的厚度,进而通过式(9)可计算熔体流经歧管和阻流区的压力降。另一方面,靠近流道宽度方向两侧,熔体的停留时间主要取决于熔体在歧管中的停留时间,即主要由歧管尺寸及其沿流道宽度方向的变化规律决定,本研究选择距离歧管入口 0.98W 处的熔体停留时间进行比较。

本研究提出的T型模具流道设计方法主要是歧管半径沿流道宽度方向减小时对阻流区厚度进行设计,因此,在不改变片材规格、材料和加工工艺,以及松弛区和成型区截面尺寸的情况下,采用等歧管半径和等阻流区厚度进行流道设计,以及采用不同的歧管半径变化规律、不同的阻流区在流道末端厚度及阻流区长度进行流道设计,对熔体流经歧管和阻流区中的压力降及熔体停留时间进行比较。

2.1 等歧管半径和等阻流区厚度的流道

目前设计T型模具的流道时,通常采用等歧管半径和等阻流区厚度的结构,并采用熔体出口流率均匀性指数UI作为校核依据[1]。均匀性指数定义为熔体在流道宽度方向末端与对称面处的单位宽度的体积流率之比,UI与流道尺寸和材料参数的关系为[2]

$$\mathrm{UI}=\left[1-\frac{(n+0.05)^{n}}{(n+1)n^{n}}\left(\frac{3n+1}{\pi(4n+2)}\right)^{n}\frac{H^{2n+1}W^{n+1}}{R^{3n+1}L}\right]\frac{1}{n} \tag{13}$$

其中:H 为阻流区厚度;R 为歧管半径。

由式(13)可知,减小阻流区厚度和增大歧管半径均可以提高熔体出口流率均匀性。工程设计中,通常要求 UI≥0.95。阻流区长度取 50 mm,厚度取 0.7 mm 和 0.9 mm,由式(13)可知,歧管半径分别为 33 mm 和 40 mm 时,UI≈0.95。相应地,熔体在阻流区中的压力降分别为 26.65 MPa 和 16.24 MPa,熔体停留时间分别为 297.4 s 和 437.0 s。

2.2 歧管形状的影响

阻流区长度取 50 mm,在流道末端的厚度取 2 mm,歧管在流道对称面和末端处的半径分别取 20 mm和 8 mm,歧管半径沿流道宽度方向按式(12)减小,m 取 0.4、0.7 和 1 时,数值计算得到阻流区厚度沿流道宽度方向的变化如图 4 所示。可以看出,随着 m 的增大,流道宽度方向任一位置阻流区的厚度减小,熔体流经歧管和阻流区的压力降增加,m 为 0.4、0.7 和 1 时,该压力降分别为 6.45 MPa、7.42 MPa和 8.42 MPa。采用四阶显式 Runge-Kutta 法求解式(10)得到的熔体停留时间分别为 35.6 s、42.5 s 和 56.0 s。

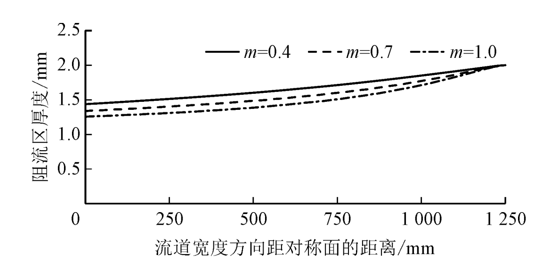


图 4 歧管半径变化规律对阻流区厚度的影响

Fig. 4 Influence of variant rule of manifold radius on thickness of choke zone

与目前常用的等歧管半径和等阻流区厚度的流道相比,本研究提出的流道设计方法无论是熔体流经歧管和阻流区的压力降还是熔体停留时间都得到显著下降。此外,即使歧管在流道对称面和末端的尺寸相同,亦可以通过改变歧管沿流道宽度方向的变化规律来调整挤出压力和熔体停留时间,为流道设计提供了较大的灵活性。

2.3 阻流区尺寸的影响

歧管在流道对称面和末端处的半径分别取 20 mm和 8 mm,在流道宽度方向按式(12)变化且 $m=0.7$,分析阻流区长度和阻流区在流道末端的厚度对熔体流经歧管和阻流区的压力降的影响。

阻流区长度取 50 mm,阻流区在流道末端的厚度 h_E 分别取 1.6 mm、2.0 mm 和 2.4 mm 时,数值求解式(7)得到的阻流区厚度沿流道宽度方向的变化如图 5 所示。可以看出,随着 h_E 的增加,流道宽度方向任一位置阻流区的厚度增加。由于阻流区在流

道末端的厚度增加，熔体流经歧管和阻流区的压力降减小，当 h_E 为 1.6 mm、2.0 mm 和 2.4 mm 时，该压力降分别为 9.28 MPa、7.42 MPa和 6.41 MPa。

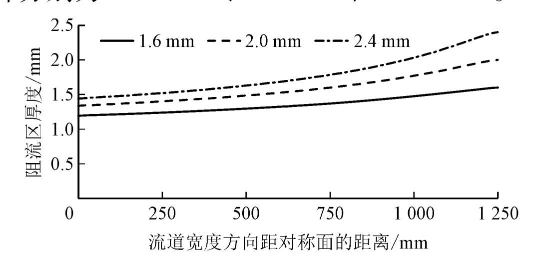


图 5　阻流区在流道末端的厚度对阻流区厚度的影响

Fig. 5　Influence of choke thickness at flow channel side on thickness of choke zone

阻流区在流道末端的厚度取 2 mm，阻流区长度 L 分别取 40 mm、50 mm 和 60 mm 时，数值求解式(7)得到的阻流区厚度沿流道宽度方向的变化如图 6 所示。可以看出，随着 L 增加，流道宽度方向任一位置阻流区的厚度增加。由于阻流区长度增加，熔体流经歧管和阻流区的压力降增加，当 L 为 40 mm、50 mm 和 60 mm 时，该压力降分别为 6.75 MPa、7.42 MPa和 8.10 MPa。

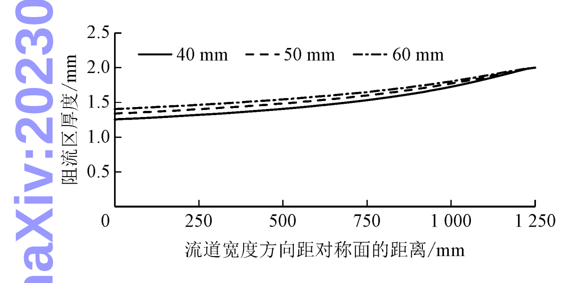


图 6　阻流区长度对阻流区厚度的影响

Fig. 6　Influence of choke length on thickness of choke zone

采用本研究的设计方法，在歧管尺寸和形状不变即熔体停留时间不变的情况下，可以通过减小阻流区长度或增加阻流区在流道末端的厚度来降低挤出压力，即可以根据成型要求进行流道设计。

3　结　论

1)采用歧管半径沿流道宽度方向减小和阻流区厚度沿流道宽度方向增加的流道结构，基于熔体出口流率均匀的条件，推导了阻流区厚度沿流道宽度方向变化的微分方程，可用于变歧管半径和变阻流区厚度的 T 型模具的流道设计。

2)采用数值方法求解阻流区厚度的微分方程并建立流道几何模型，对熔体在流道中的流场进行了数值模拟，对所设计流道的熔体出口流率进行了验证，表明所推导的阻流区厚度的微分方程是可靠的。

3)与等歧管半径和等阻流区厚度的流道相比，本研究提出的变歧管半径和变阻流区厚度的流道设计方法既能满足沿流道宽度方向熔体出口流率的均匀性，又显著降低了挤出压力和熔体停留时间。

4)与等歧管半径和等阻流区厚度的流道相比，通过对歧管尺寸和形状的设计，能够在不显著增加挤出压力的情况下显著降低熔体在流道中的停留时间，通过对阻流区长度和厚度的设计，可以在不增加熔体停留时间的情况下调整挤出压力。

参考文献：

[1] 唐志玉. 挤塑模设计[M]. 北京：化学工业出版社，1997：112-118.

[2] 林师沛，赵洪，刘芳. 塑料加工流变学及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，2008：161-164.

[3] 麻向军，何和智. T 型模头熔体流动与模具变形耦合的数值模拟[J]. 华南理工大学学报：自然科学版，2010，38(5)：122-126.
MA Xiangjun，HE Hezhi. Numerical simulation of coupling of melt flow and die deformation in T die[J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition)，2010，38(5)：122-126(in Chinese).

[4] 申开智. 塑料成型模具[M]. 3 版. 北京：中国轻工业出版社，2013：312-313.

[5] BATES S J，PITTMAN J F T，SIENZ J，et al. Enhancing slit die performance by optimization of restrict profiles[J]. Polymer engineering and science，2003，43(8)：1500-1511.

[6] SIENZ J，BATES S J，PITTMAN J F T. Flow restrict design for extrusion slit die for a range of materials：simulation and comparison of optimization techniques[J]. Finite elements in analysis and design，2006，42：430-453.

[7] WANG Q，SMITH D E. Analysis of the fluid-structure interaction in the optimization-based design of polymer sheeting dies[J]. Journal of applied polymer science，2007，103：3994-4004.

[8] HOPMANN C，MICHAEL W. Extrusion dies for plastics and rubber[M]. 4th Edition. Cincinnati：Hanser Publications，2016：180-187.

[9] 叶镇波，罗庆青，李意明，等. 平肩式塑料挤出平模头：203246061[P]. 2013-10-23.

[10] 陈晋南，何吉宇. 聚合物流变学及其应用[M]. 北京：中国轻工业出版社，2018：172-185.

[11] 王和慧，朱文敏，王朝平，等. 入口半径为参数的衣架式模头设计及数值模拟[J]. 塑料，2016，45(2)：101-105.
WANG Hehui，ZHU Wenmin，WANG Chaoping，et al. Design of coat-hanger die with entrance radius as parameter and its numerical verification[J]. Plastics，2016，45(2)：101-105 (in Chinese).

[12] 李庆扬，王能超，易大义. 数值分析[M]. 5 版. 北京：清华大学出版社，2008：286-291.

（编辑　张璐）